

---

---

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.  
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

---

---

УДК 520.16

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТРЕНИЕ  
УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА**© 2021 г. В. В. Алисин<sup>1</sup>, М. Н. Рошин<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**\*e-mail: roschin50@yandex.ru*

Поступила в редакцию 15.05.2020 г.

Принята к публикации 22.10.2020 г.

Статья посвящена экспериментальному определению антифрикционных свойств углерод-углеродного композита при трении скольжения по стали 40X13 в среде углекислого газа. Исследуются изменения коэффициента трения при нагреве до 800°C в диапазонах скоростей 0.05–0.25 м/с и контактных давлений 0.5–1 МПа. Новизна исследования состоит в определении трибологических свойств мало изученной пары трения перспективной для применения в авиационно-космической технике. Особое внимание уделяется трибологическим свойствам пары трения при 500°C. На основе проведенного исследования рекомендован коэффициент трения для проектирования подшипников скольжения и шарниров космических аппаратов для работы в атмосфере Венеры.

*Ключевые слова:* углерод-углеродный композит, высокотемпературные трибологические испытания, коэффициент трения, антифрикционные свойства

**DOI:** 10.31857/S0235711921010041

Конструкционные углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) представляют повышенный интерес в авиационно-космической промышленности в связи с низким удельным весом, высокими прочностными характеристиками и способностью работать в условиях высоких температур. В узлах трения аппаратов различного назначения дополнительным требованием к применяемым материалам являются характеристики антифрикционности. Высокие коэффициенты трения вынуждают повышать мощности приводов, что ведет к увеличению массы аппарата. В связи с высокой стоимостью этих материалов выделяются исследования связанные с применением углеродных композитов области высоких температур [1]. Эксплуатация изделий из углеродного композита в условиях высоких температур связана с окислением графита, потерей массы и прочностных свойств материала. Исследованиям по защите углеродного композита от высокотемпературного окисления посвящены работы [2]. При большом объеме исследований влияния температуры на прочностные свойства углеродных композитов практически очень мало исследований трибологических свойств этих композитов, особенно в области высокотемпературных испытаний. В основном высокотемпературные трибологические испытания углеродных материалов проводятся для решения частных задач по повышению ресурса и надежности узлов трения, например токосъемников [3], авиационных тормозов [4], авиационной и космической техники [5]. Однако для решения проблем создания космических аппаратов будущего [6–8] актуально проведение высокотемпературных трибологических испытаний углеродных композитов. Антифрикционные свойства любых материалов зависят от усло-



Рис. 1. Камера, в которой размещен испытательный узел.

вий эксплуатации. Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа, высоких температур и давления. К числу проблем будущего относятся задачи исследования Венеры, которые требуют создания аппаратов для долговременной работы на поверхности планеты, как стационарных, так и подвижных платформ. Для силовых элементов конструкции аппаратов (например, оси) применяются стали. Трибологические характеристики УУКМ изучены очень мало. При большом объеме исследований влияния температуры на прочностные свойства углеродных композитов [9–11] очень мало исследований трибологических свойств этих композитов, особенно в области высокотемпературных испытаний.

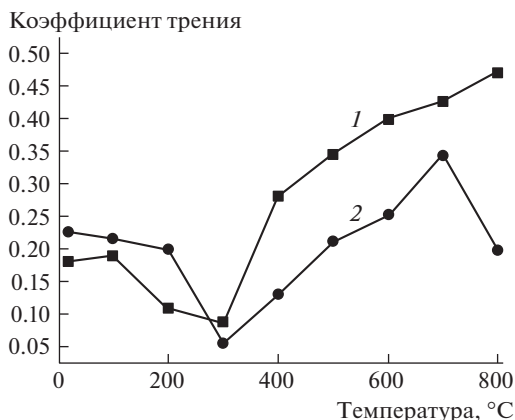
Цель статьи – экспериментально определить закономерности изменения коэффициента трения углерод-углеродного композиционного материала при трении по стали в среде  $\text{CO}_2$  в интервале температур 20–800°C, контактных давлений 0.5–1 МПа, скоростей 0.05–0.25 м/с.

**Материалы и оборудование.** Образцы изготовлены из углерод-углеродного композиционного материала типа Аргалон 2D в виде пластин  $10 \cdot 10$  мм, контртело из стали 40Х13 в виде диска. Трибологические испытания проведены на модернизированном стенде ВТМТ-1000У по схеме “диск–палец”.

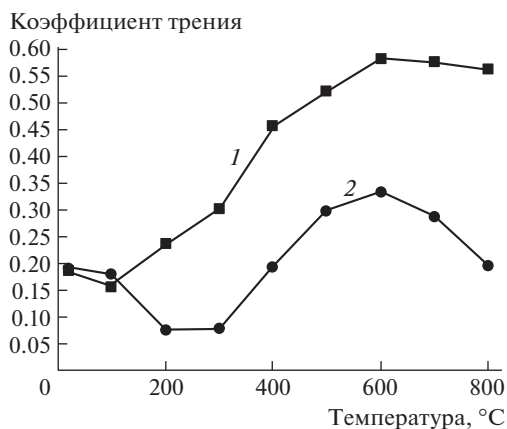
Усовершенствование стенда заключалось в установке испытательного узла в защитную камеру, в которую подавался углекислый газ, рис. 1. Концентрация газа контролировалась и поддерживалась в диапазоне 95–98%. Во время испытаний велась запись температуры и момента трения при фиксированной нагрузке и скорости.

**Результаты и обсуждения.** Эксперименты проводились ступенчато по мере нагрева через каждые 100°C, при нагрузке 0.5 МПа и 1 МПа, скорости 0.05 и 0.25 м/с. На первом этапе на воздухе, на втором в среде  $\text{CO}_2$ . На рис. 2, 3 показано влияние температуры на коэффициент трения. На графиках можно выделить три области. Первая область охватывает температурный интервал 20–300°C. В этом интервале коэффициент трения уменьшается. Вторая область находится в интервале 300–700°C. В этом интервале наблюдается рост коэффициента трения. Третья область относится к температурам больше 700°C, в ней коэффициент трения уменьшается.

Температурный интервал первой области соответствует температурам разложения смол. Приповерхностный слой нагревается быстрее основы композита, поэтому он размягчается. Композиционный материал в объеме сохраняет механические характеристики и в их числе твердость. В поверхностном слое в процессе нагрева и размягчения смолы уменьшается ее прочность на сдвиг. Когда прочность молекулярных связей на контакте превысит прочность нагретой смолы происходит перенос смолы на стальное контртело, сначала местами. Трение поверхностей плавно переходит от сухого трения к смешанному и граничному, что выражается плавным уменьшением коэффи-



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента трения от температуры при нагрузке 0.5 МПа и скорости 0.05 м/с: 1 – УУКМ; 2 – УУКМ в среде  $\text{CO}_2$ .



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента трения от температуры при нагрузке 0.5 МПа и скорости 0.25 м/с: 1 – УУКМ; 2 – УУКМ в среде  $\text{CO}_2$ .

циента трения. При температуре 300°C образовавшаяся пленка граничной смазки сгорает и формируется режим сухого трения. Соответствуя новому состоянию поверхностей трения во второй области формируется новая молекулярная связь с другой величиной прочности на сдвиг, которая не меняется во всем температурном интервале. Это объясняется природой молекулярных связей, в основе которых дисперсионное взаимодействие, т.е. электрическое взаимодействие, которое не зависит от температуры. В объеме материал продолжает нагреваться и твердость его уменьшается. Поэтому коэффициент трения возрастает. В третьей области при температуре выше 700°C начинается окисление углерода, разрушение и потеря вещества, сопровождающееся уменьшением коэффициента трения.

На поверхности планеты температура 460°C и вероятно мало меняется в течение суток Венеры, поэтому актуально изучение влияния среды и температуры на антифрик-

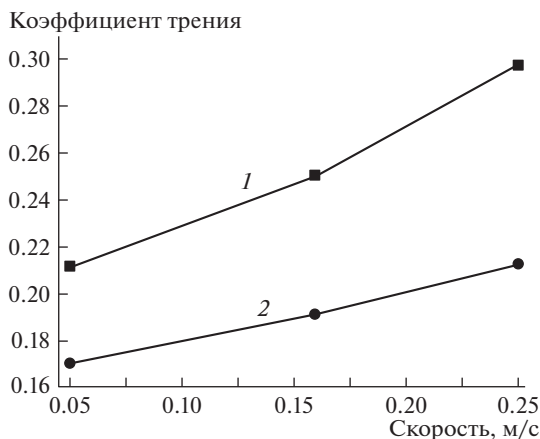


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от скорости при температуре 500°C в среде CO<sub>2</sub> и нагрузке, МПа: 1 – 0.5; 2 – 1.0.

ционные свойства пары трения углеродный композит–сталь. Надежность и ресурс работы шарниров и подшипников скольжения зависит от нагрузочно-скоростного фактора. Определены предельные значения изменения коэффициента трения при температуре среды 500°C в исследуемом интервале скоростей и нагрузок (рис. 4).

Эксперимент хорошо воспроизводится. Полученные экспериментальные зависимости характеризуются плавным изменением коэффициента трения. С увеличением скорости при нагрузке 1 МПа коэффициент трения монотонно увеличивается на 10% во всем диапазоне скоростей, а при нагрузке 0.5 МПа увеличивается на 15%. Установлено, что изменение коэффициента трения во всем исследуемом диапазоне скоростей и нагрузок не превышает 15%. Эта величина соизмерима с точностью высокотемпературных трибологических испытаний. Поэтому применительно к паре трения УУКМ–сталь в подшипниках скольжения работающих при температурах близких к 500°C в среде углекислого газа, для расчетов надежности и ресурса работы можно принять коэффициент трения равным 0.22 пренебрегая влиянием скорости и нагрузки в изученном диапазоне.

**Выводы.** 1. Исследованы антифрикционные свойства углерод-углеродного композиционного материала при трении без смазки по стали 40X13 в среде углекислого газа в диапазонах температур 20–800°C, скоростей 0.05–0.25 м/с, контактных давлений 0.5–1 МПа. В сравнении с коэффициентом трения на воздухе установлен эффект сильного уменьшения коэффициента трения в среде CO<sub>2</sub> в интервале температур 300–700°C. 2. Эффект уменьшения коэффициента трения объясняется образованием пленки твердой смазки на основе графита, которая в процессе трения и износа восстанавливается по механизму карбонизации в условиях высоких температур. 3. Применительно к проектированию узлов трения аппаратов будущего, предназначенных для работы на поверхности Венеры, определен коэффициент трения соответствующий температуре 500°C. 4. Экспериментально показано, что в диапазоне температур 400–600°C резких изменений коэффициента трения не установлено. Влияние на коэффициент трения нагрузки и скорости в исследованных диапазонах не превышает 15%.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hajiloo H., Green M.F., Gales J.* Mechanical properties of GFRP reinforcing bars at high temperatures // *Constr. Build. Mater.* 2018. V. 162. P. 142.
2. *Zhang C., Chen M., Scott C. et al.* New insights into the early stages of thermal oxidation of carbon/carbon composites using electrochemical methods // *Carbon*, 2016. V. 108. P. 178.
3. *Wang P., Zhang H. et al.* Wear and friction behaviours of copper mesh and flaky graphite- modified carbon/carbon composite for sliding contact material under electric current // *Wear*. 2017. V. 380–381. P. 59.
4. *Chichinadze A.V., Albagachiev A.Y., Kozhemyakina V.D. et al.* Assessment of friction and wear characteristics of domestic friction composite materials in loaded aircraft brakes // *Journal of Friction and Wear*. 2009. V. 30. № 4. P. 261.
5. *Алисин В.В., Роштин М.Н., Лукьянов А.И. и др.* Разработка и исследование узлов трения, работающих при высоких температурах, применительно к космическим аппаратам // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2019. № 1. С. 61.
6. *Peralta J.* Venus's winds and temperatures during the Messenger's flyby: an approximation to a three-dimensional instantaneous state of the atmosphere // *Geophys. Res. Lett.*, 2017. V. 44. P. 3907.
7. *Marcq E., Jessup K.L., Baggio L. et al.* Climatology of SO<sub>2</sub> and UV absorber at Venus' cloud top from SPICAV-UV nadir dataset / *Icarus*, 2020. V. 335, artical 113368.
8. *Titov D.V., Ignatiev N.I., McGouldrick K. et al.* Clouds and hazes of Venus // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. P. 126.
9. *Correia J.R., Gomes M.M., Pires, J.M., Branco F.A.* Mechanical behaviour of pultruded glass fibre reinforced polymer composites at elevated temperature: Experiments and model assessment // *Compos. Struct.* 2013. V. 98. P. 303.
10. *Zhou F., Zhang J., Song S.* Effect of Temperature on Material Properties of arbon Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Tendons: Experiments and Model Assessment // *Materials*. 2019. V. 12. P. 1025. <https://doi.org/10.3390/ma12071025>
11. *Gillard A.P., Couégnat G., Chupin S. et al.* Modeling of the non-linear mechanical and thermomechanical behavior of 3D carbon/carbon composites based on internal interfaces // *Carbon*, 2019. V. 154. P. 178.